

## 一种水平探测荧光激光雷达系统常数标定方法

张寅超, 马扬程, 陈思颖\*, 陈和\*\*, 郭磐, 檀望舒, 李道明, 杨显

北京理工大学光电学院, 北京 100081

**摘要** 水平探测荧光激光雷达是观测大气有机气溶胶的有效工具, 系统常数的标定是利用荧光回波信号反演有机气溶胶浓度的关键。提出了一种基于荧光-米回波信号强度比的水平探测荧光激光雷达系统常数标定方法。该方法利用水平探测的荧光-米回波强度比和粒子计数器定点测量的气溶胶浓度数据来获得激光雷达的系统常数, 进而减小系统几何因子的影响。在仿真计算中, 将所提方法与传统标定方法进行对比, 验证了所提方法的精度与稳定性。最后, 利用一台水平近场探测的荧光-米散射双通道激光雷达进行实际标定实验, 验证了所提方法的可行性和有效性。结果表明, 所提方法可以较好地减小几何因子对标定精度的影响, 并具有更好的稳定性。

**关键词** 遥感; 荧光激光雷达; 水平探测; 系统常数标定; 荧光-米信号比

中图分类号 TP706 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1828006

## Calibration Method for System Constants of Horizontal Detection Fluorescence Lidar

Zhang Yinchao, Ma Yangcheng, Chen Siying\*, Chen He\*\*, Guo Pan, Tan Wangshu, Li Daoming, Yang Xian

*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

**Abstract** Horizontal detection fluorescence lidar is an effective tool to observe atmospheric organic aerosols, and the calibration of its system constants is the key to obtaining the concentration of organic aerosols with fluorescence echo signals by inversion. A calibration method for the system constants of horizontal detection fluorescence lidar based on the fluorescence-Mie scattering echo signal intensity ratio is proposed. The proposed method uses the fluorescence-Mie scattering echo signal intensity ratio attained by horizontal detection and the aerosol concentration data measured by the particle counter at fixed points to obtain the system constants of the lidar, and thereby reduce the influence of the system geometry factor. The accuracy and stability of the proposed method are verified by a comparison with the traditional calibration method in the numerical calculation. Its feasibility and effectiveness are proved by a practical calibration experiment with a fluorescence-Mie scattering dual-channel lidar for horizontal near-field detection. The results show that the proposed method not only can effectively reduce the influence of the geometrical factor on calibration accuracy, but also offers better stability.

**Key words** remote sensing; fluorescence lidar; horizontal detection; system constant calibration; fluorescence-Mie scattering signal ratio

## 1 引言

有机气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 其种类繁多。一些有机气溶胶会给人的健康和正常生活带来很大的隐患<sup>[1]</sup>, 比如细菌、病毒能够在大气中繁殖并传播, 其存活时间越长, 危害性越大<sup>[2]</sup>。荧光激光雷达能够对有机气溶胶进行高效、实时的探测, 且经过标定

后, 其准确性也可以得到保证, 是目前常见的监测有机气溶胶的方案<sup>[3]</sup>。

在使用荧光激光雷达探测有机气溶胶时, 为了更精确便捷地实现浓度探测, 需要建立起回波信号和气溶胶浓度间的对应关系, 将其中的常系数称为系统常数。目前, 国内外标定水平探测荧光激光雷达系统常数的最常用方法是通过荧光通道信号强度和粒子浓度

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(42005137)

通信作者: \*csy@bit.edu.cn; \*\*shinianshao@bit.edu.cn

的线性关系进行标定,主要思路有两种。一种思路是利用粒子计数器辅助,建立荧光回波强度和粒子计数器计数结果的线性关系来实现标定,如:Shoshanim 等<sup>[4]</sup>在距激光雷达 170 m 的一个 3 m 长的腔室内,使用一个带有干燥装置的气溶胶发生器生成气溶胶云,通过粒子计数器记录气溶胶浓度随时间变化的数据,并将数据与激光雷达接收到的荧光信号强度进行线性回归分析,进而标定系统;Wojtanowski 等<sup>[5]</sup>也进行了类似的工作。另一种思路是已知样品浓度,建立它与荧光回波强度的线性关系来实现标定,比如 Stoyanov 等<sup>[6]</sup>。类似地,北京理工大学激光雷达实验室通过验证两个荧光通道的回波信号强度与喷发的色氨酸溶液浓度之间存在良好的线性关系,对系统常数进行了标定<sup>[7]</sup>。这种标定方法步骤简便、精度良好,但在标定过程和后续使用中易受到系统几何因子的影响,对系统的稳定性要求较高。对于这种问题,Simard 等<sup>[8]</sup>在荧光激光雷达上加装氮气拉曼通道,通过一台粒子计数器记录样品气溶胶浓度,对气溶胶浓度与激光雷达接收到的荧光-氮气拉曼信号强度比进行线性回归分析,进而实现系统的标定。这种标定方法通过信号比的形式消减系统几何因子的影响,但由于拉曼信号的强度比荧光信号强度小三个数量级左右,故需要对信号进行较长时间的累加积分,无法与荧光信号同步探测,这

就导致其标定精度受到影响<sup>[8]</sup>,而且为了保证探测效果,拉曼通道需要噪声更低、灵敏度更高的探测器,对器件性能的要求更高。

本文提出了一种基于荧光-米回波信号强度比的系统常数标定方法,利用荧光信号-米散射信号强度比,消减系统几何因子对标定精度的影响,并通过弹性后向散射系数加以修正,来实现系统常数的标定。同时,所提方法减小了后续使用中机械振动、工作环境改变和光路失调等因素导致的几何因子变化所引入的探测误差。通过在仿真计算中,与传统标定方法进行对比,验证了所提方法的精度和稳定性。通过对一台水平近场探测激光雷达进行实际标定实验,验证了所提方法的可行性和有效性。

## 2 基本原理

根据激光雷达方程,系统接收到的回波光子数<sup>[9]</sup>可以表示为

$$N(z) = \frac{k_0}{z^2} \xi(z) T(\lambda, z) \beta(z), \quad (1)$$

式中: $k_0$ 为与系统硬件参数相关的常数; $z$ 为探测距离; $\xi(z)$ 为系统几何因子; $T(\lambda, z)$ 为消光损耗引入的大气透过率; $\beta(z)$ 为后向散射系数。荧光通道大气透过率  $T_c(\lambda, z)$  和米散射通道大气透过率  $T_e(\lambda, z)$  的表达式为

$$\begin{cases} T_c(\lambda, z) = \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_m(\lambda_0) + \alpha_a(\lambda_0, z) + \alpha_m(\lambda_c) + \alpha_a(\lambda_c, z)] dz\right\}, \\ T_e(\lambda, z) = \exp\left\{-2\int_0^z [\alpha_m(\lambda_0) + \alpha_a(\lambda_0, z)] dz\right\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\lambda_0$ 为出射激光波长; $\lambda_c$ 为激发荧光中心波长; $\alpha_m(\lambda)$ 为大气分子消光系数,在水平探测情况下,可以近似认为它是一个不随距离变化的定值; $\alpha_a(\lambda, z)$ 为气溶胶分子消光系数,它包含大气气溶胶消光和目标气溶胶消光两部分。荧光通道后向散射系数  $\beta_c(z)$  和米散射通道后向散射系数  $\beta_e(z)$ <sup>[10-11]</sup> 的表达式为

$$\begin{cases} \beta_c(z) = N_{\text{bio}}(z) S_c \\ \beta_e(z) = \beta_m(z) + \beta_a(z) + \beta_{\text{ac}}(z) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $N_{\text{bio}}(z)$ 为有机气溶胶粒子数密度; $S_c$ 为有机气溶胶粒子的荧光后向散射截面<sup>[11]</sup>; $\beta_m(z)$ 为大气分子后向散射系数; $\beta_a(z)$ 为大气气溶胶粒子后向散射系数; $\beta_{\text{ac}}(z)$ 为待测有机气溶胶后向散射系数。

通过式(1)~(3)可以得到荧光-米散射回波信号比的表达式,即

$$R_{\text{cc}}(z) = \frac{N_c(z)}{N_e(z)} = \frac{k_1 \exp\left\{k_2 \int_0^z [\beta_a(z) + \beta_{\text{ac}}(z)] dz\right\}}{\beta_e(z)} \beta_c(z), \quad (4)$$

式中: $k_1$ 是一个与系统两通道差异相关的常数,它的具

体测定方法在文献[9]中有详细介绍; $k_2 = S_a \left[ (\lambda_c/\lambda_0)^{-\alpha} - 1 \right]$ ,其中  $S_a = \alpha_a(z) / [\beta_a(z) + \beta_{\text{ac}}(z)]$  为气溶胶消光后向散射比, $\alpha$ 为 Angström 指数<sup>[12-13]</sup>,它反映了大气中气溶胶粒子的尺度。

在近场探测的情况下,两通道气溶胶消光系数  $\alpha_a(\lambda_c, z)$  与  $\alpha_a(\lambda_0, z)$  差异并不是很大,所以可将  $\exp\left\{k_2 \int_0^z [\beta_a(z) + \beta_{\text{ac}}(z)] dz\right\}$  这一项并入系统两通道差异常数  $k_1$  中。当系统探测的目标气溶胶确定后,其荧光后向散射截面  $S_c$  也可以作为一个确定的常数,此时式(4)可以简化为

$$N_{\text{bio}}(z) = \frac{\beta_c(z)}{k} R_{\text{cc}}(z), \quad (5)$$

式中: $k = k_1 \exp\left\{k_2 \int_0^z [\beta_a(z) + \beta_{\text{ac}}(z)] dz\right\} S_c$  为系统常数,是一个与目标有机气溶胶散射性质和系统硬件参数相关的常数。

水平近场探测时若可以直接测量目标有机气溶胶浓度,则可以求出系统常数  $k$ ,但在实际标定实验中,将整条探测路径上的气溶胶浓度同时测出是不现实的,故需要固定粒子计数器位置,用激光雷达和粒子计

数器同时记录探测结果。利用 Fernald 算法<sup>[14]</sup>求出弹性后向散射系数,将同一时间的粒子计数结果  $N_{\text{count}}(z, t)$ 、激光雷达在粒子计数器位置的回波信号和该位置弹性后向散射系数  $\beta_e(z, t)$  代入式(6)中计算得到时间为  $t$  的系统常数  $k(t)$ ,最后对不同时间的  $k(t)$  求均值得到系统常数  $k$  的标定结果。 $k(t)$  的表达式为

$$k(t) = \frac{\beta_e(z, t)}{N_{\text{count}}(z, t)} R_{\text{ce}}(z, t)。 \quad (6)$$

具体的标定流程如图 1 所示。在标定系统常数后,就建立起了激光雷达信号和目标气溶胶浓度间的近似关系,只要同时测得荧光和米散射回波信号,并使用 Fernald 算法反演后向散射系数,再将它们代入式(5)中就可以反演出探测路径上的目标气溶胶浓度分布。

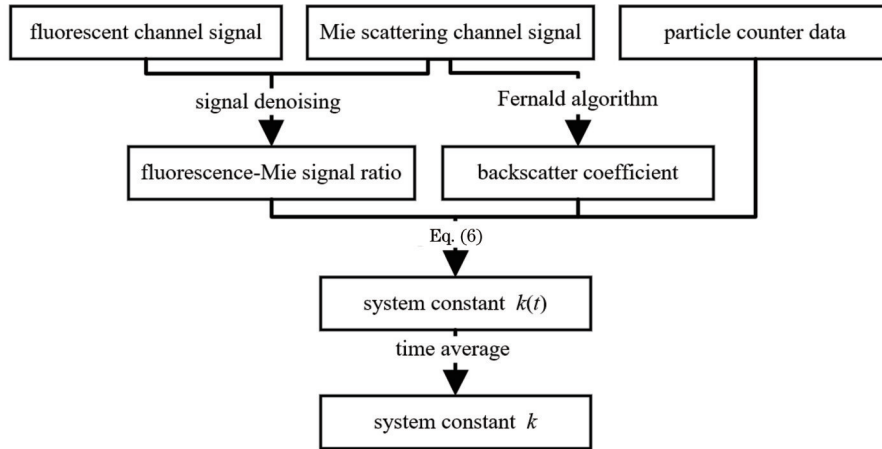


图 1 系统常数标定流程图

Fig. 1 Flow chart of system constant calibration

### 3 数值仿真与分析

为了验证所提标定方法(以下称为比值法)的准确性和稳定性,通过数值仿真与传统标定方法(利用荧光通道回波信号强度与目标气溶胶浓度近似成正比的原理进行标定)进行分析对比。在仿真中,对于大气后向散射系数和消光系数采用标准大气模型计算<sup>[15]</sup>,取气溶胶消光后向散射比为  $S_a = 50$ ,大气分子的消光后向散射比为  $S_m = 8\pi/3$ 。利用高斯函数模拟生成目标有机气溶胶的浓度分布曲线<sup>[16]</sup>,并用它乘上弹性后向散射截面  $S_e$ ,即可得到目标有机气溶胶的后向散射系数  $\beta_{\text{ac}}(z)$ 。

仿真中模拟了背景光噪声和暗噪声对回波光子数的影响,分别用  $N_b$  和  $N_d$  表示<sup>[17]</sup>,并构造了一个正态分布随机量  $R_{\text{vol}}$  来模拟噪声随机波动的影响<sup>[16, 18]</sup>。回波信号的噪声  $N_{\text{noise}}$  可以表示为

$$N_{\text{noise}} = (1 + R_{\text{vol}})(N_d + N_b)。 \quad (7)$$

仿真计算时采用实验室现有的一台水平近场探测荧光激光雷达的参数,如表 1 所示,仿真具体流程如图 2 所示。

首先进行标定仿真,生成一组目标有机气溶胶的浓度分布曲线,如图 3(a) 所示,进而得到信噪比为 30 dB 的两通道回波信号曲线,用它们可以求得回波信号比。根据文献<sup>[14]</sup>,在水平探测时,选取适当位置处的米散射回波信号利用斜率法<sup>[19-20]</sup>计算消光系数,并将该消光系数作为 Fernald 算法所需的参考点值。参考点的消光系数的计算公式为

表 1 仿真采用的参数

Table 1 Parameters used in simulation

Parameter	Value
Laser wavelength $\lambda_0$ /nm	355
Beam divergence angle $\theta_b$ /mrad	0.1
Telescope aperture $D$ /mm	120
Telescope field of view $\theta_t$ /mrad	1
Geometric factor $\xi(z)$	1
Detector quantum efficiency $\eta$ /%	21.24
Background light noise $N_b$ /s <sup>-1</sup>	10 <sup>8</sup>
Dark noise $N_d$ /s <sup>-1</sup>	10 <sup>3</sup>
Molecular extinction coefficient $\alpha_m(\lambda_0)$ /km <sup>-1</sup>	6.5 × 10 <sup>-2</sup>
Mie backscattering cross section $S_e$ / (m <sup>2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	10 <sup>-12</sup>
Fluorescence backscattering cross section $S_c$ / (m <sup>2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	10 <sup>-15</sup>

$$\alpha_e = -\frac{1}{2} \frac{S_0 - S_r}{z_0 - z_r}, \quad (8)$$

式中:  $z_r$  为参考点的位置;  $z_0$  为参考点附近点的位置;  $S_r = \ln[z_r^2 N_e(z_r)]$  为参考点距离平方修正过的米散射回波信号的对数值<sup>[19]</sup>;  $S_0$  为  $z_0$  处距离平方修正过的米散射回波信号的对数值。通过 Fernald 算法得到后向散射系数。为了模拟实际标定过程,需要选择路径上一个位置的浓度真值来代表粒子计数器的计数结果。下面讨论粒子计数器所在位置附近有机气溶胶浓度对标定结果的影响,为此根据有机气溶胶的浓度分布规

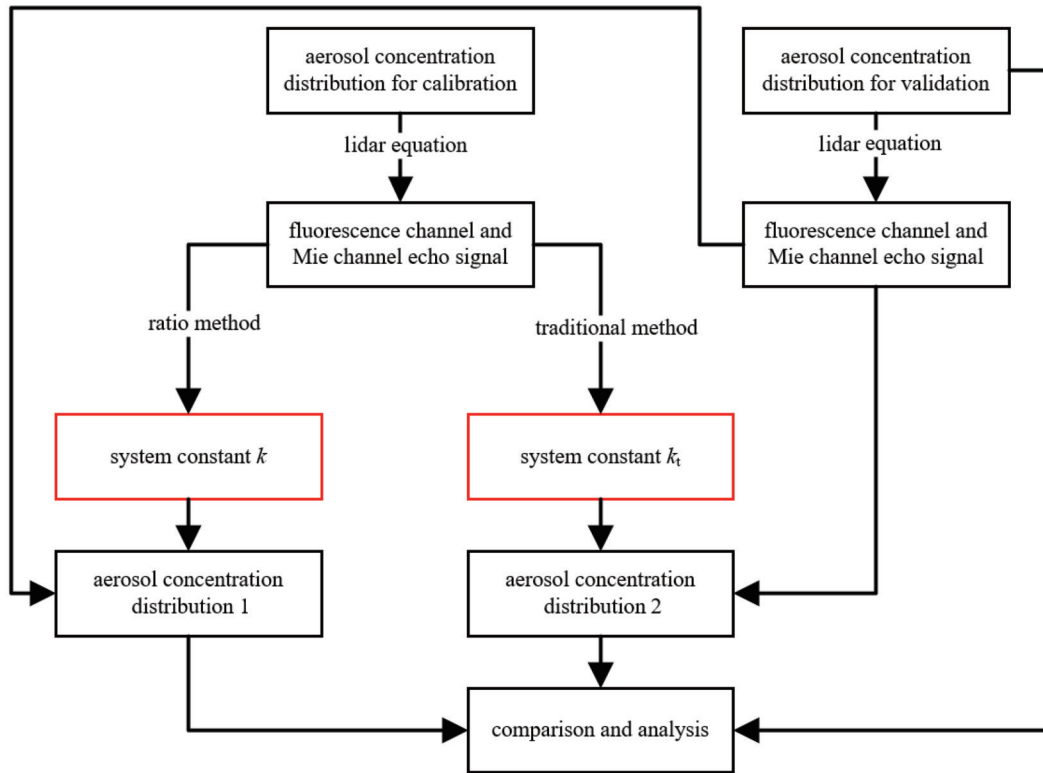


图 2 数值仿真流程图

Fig. 2 Flow chart of numerical simulation

律和实际测量经验,选取了 140, 147, 149 m 三个位置作为典型值进行研究,它们分别代表有机气溶胶浓度极低的位置,有机气溶胶扩散路径中的位置,接近浓度峰值的位置。将这些位置的浓度真值和带噪声的回波信号比分别代入式(6)计算系统常数  $k$ 。作为对照组的传统标定方法认为,荧光通道回波信号强度与目标有机气溶胶浓度近似成正比,以此计算得到系统常数  $k_t$ 。用三个位置的数据反演的目标有机气溶胶浓度结果分别如图 3(b)~(d)所示。

标定仿真使用的是峰值位于 150 m、粒子数浓度为  $5 \times 10^5 \text{ L}^{-1}$  的有机气溶胶分布。从图 3 中可以看出:用有机气溶胶浓度极低位置(140 m)的数据进行标定会造成巨大误差;用有机气溶胶扩散路径中的位置(147 m)或接近浓度峰值位置(149 m)的数据,反演效果良好,但两者仍有一定差别。当用有机气溶胶扩散路径中的位置(147 m)的数据进行标定时,使用比值标定法和传统标定方法得到的反演结果在半峰全宽内的均方根误差分别为  $1.63 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$  和  $2.41 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$ ,而用接近浓度峰值位置(149 m)的数据进行标定时,反演结果在半峰全宽内的均方根误差分别为  $5.13 \times 10^3 \text{ L}^{-1}$  和  $6.19 \times 10^3 \text{ L}^{-1}$ 。虽然用接近浓度峰值处的数据得到的反演结果更好,但是考虑到在实际标定中,如果在浓度过高的位置使用粒子计数器进行采集,容易使仪器饱和,影响数据准确度。因此,应该在粒子计数器正常工作的前提下,选取尽量靠近浓度峰值的位置,用此处的数据进行标定。相应地,在接下来的仿真中,使用的是在有机气溶胶扩散路径中典型

位置(147 m)的数据标定得到的系统常数  $k$  和  $k_t$ 。

为了验证得到的系统常数的稳定性,进行了进一步的反演仿真计算。首先,生成一组有两个峰值的目标有机气溶胶浓度分布曲线,如图 4(a)所示。然后,按照同样的方法得到信噪比为 30 dB 的两通道回波信号曲线,通过 Fernald 算法得到后向散射系数,并利用比值标定法和传统标定方法反演目标有机气溶胶浓度分布,结果如图 4(b)所示。其中,在最后一步反演目标有机气溶胶浓度分布时,使用的系统常数  $k$  和  $k_t$  是上文仿真中确定的值。

反演仿真使用的是峰值位于 100 m 和 200 m,粒子数浓度分别为  $3 \times 10^5 \text{ L}^{-1}$  和  $8 \times 10^5 \text{ L}^{-1}$  的分布。从图 4 中可以看出:用所提标定方法得到的反演结果在半峰全宽内的均方根误差为  $1.72 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$ ;用作为参考的传统标定方法得到的反演结果在半峰全宽内的均方根误差为  $3.59 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$ 。此处的误差来源主要有三个:1)回波噪声;2)标定的系统常数只是由一小部分数据确定的,这不可避免地会对浓度反演精度带来影响;3)反演弹性后向散射系数时也会带来一定的误差。然而,从图 4(c)和图 4(d)中依旧可以看到,两种方法对峰值位于 100 m 的有机气溶胶分布的反演精度相近,而比值标定法对峰值位于 200 m 的有机气溶胶分布的反演精度明显优于传统标定法。这是因为传统标定方法认为,荧光通道回波信号强度与目标有机气溶胶浓度近似成正比,忽略了激光透射气溶胶团和大气传输带来的消光效应,导致反演精度下降。同时,这种现象会随激光所透射气溶胶团的浓度的上升和探测距离的

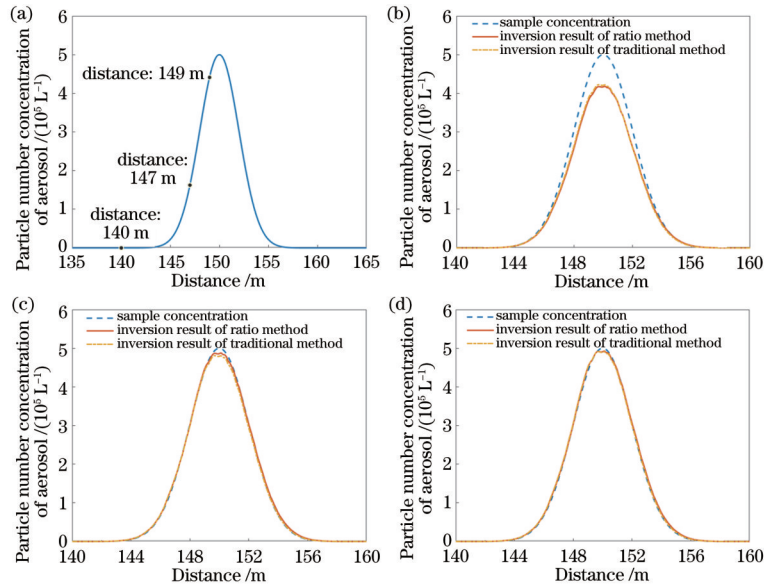


图 3 用三种不同位置的仿真浓度数据反演目标气溶胶浓度分布的结果。(a)目标气溶胶的浓度分布曲线;(b)用 140 m 处数据反演目标气溶胶浓度的结果曲线;(c)用 147 m 处数据反演目标气溶胶浓度的结果曲线;(d)用 149 m 处数据反演目标气溶胶浓度的结果曲线

Fig. 3 Results of aerosol concentration distribution inversion obtained by using simulated concentration data from three different locations. (a) Concentration distribution curve of target aerosol; (b) result curve of target aerosol concentration retrieved from data at 140 m; (c) result curve of target aerosol concentration retrieved from data at 147 m; (d) result curve of target aerosol concentration retrieved from data at 149 m

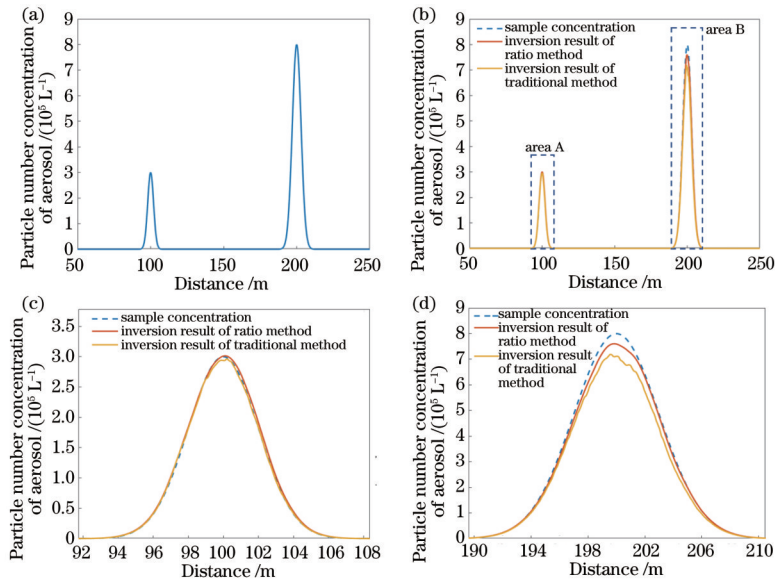


图 4 用两种不同方法反演目标气溶胶浓度结果对比。(a)仿真的目标气溶胶的浓度分布曲线;(b)反演得到的目标气溶胶浓度结果曲线;(c)图 4(b)中区域 A 的放大图;(d)图 4(b)中区域 B 的放大图

Fig. 4 Comparison of inversion results of target aerosol concentration using two different methods. (a) Simulated concentration distribution curve of target aerosol; (b) result curve of target aerosol concentration obtained by inversion; (c) partial enlarged view of area A in Fig. 4(b); (d) partial enlarged view of area B in Fig. 4(b)

上升而愈发明显。比值标定法使用弹性后向散射系数对荧光-米散射信号强度比进行修正,可以更好地减弱消光效应的影响,提升浓度反演精度。

下面进一步讨论系统常数标定和浓度反演时的数据信噪比对准确度的影响。在系统常数标定时,在不同信噪比( $M_{RSN}$ )下分别采用比值标定法和传统标定

法对系统常数进行标定,得到  $k$  和  $k_t$ 。在反演验证时,在每一个信噪比下生成 100 组模拟回波信号,对每一组信号分别用  $k$  和  $k_t$  进行反演,得到对应的目标有机气溶胶浓度反演结果,并计算在半峰全宽内的均方根误差。两种标定方法的浓度反演误差如图 5 所示。

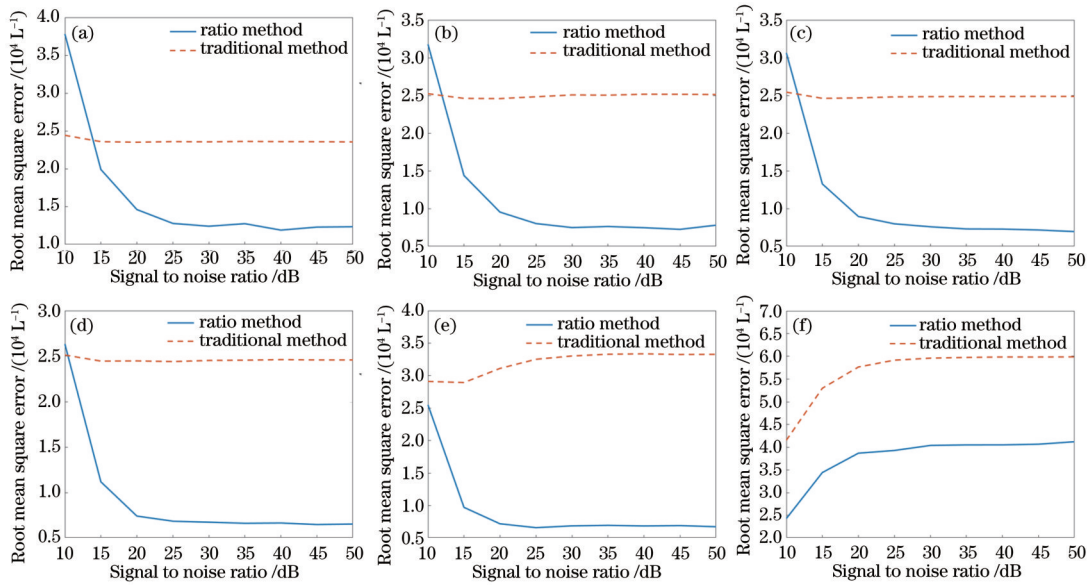


图 5 不同  $M_{RSN}$  下基于两种标定方法的目标气溶胶浓度反演误差对比。(a)  $M_{RSN}=40$  dB; (b)  $M_{RSN}=30$  dB; (c)  $M_{RSN}=25$  dB; (d)  $M_{RSN}=20$  dB; (e)  $M_{RSN}=15$  dB; (f)  $M_{RSN}=10$  dB  
 Fig. 5 Comparison of aerosol concentration inversion errors based on two calibration methods at different  $M_{RSN}$ . (a)  $M_{RSN}=40$  dB; (b)  $M_{RSN}=30$  dB; (c)  $M_{RSN}=25$  dB; (d)  $M_{RSN}=20$  dB; (e)  $M_{RSN}=15$  dB; (f)  $M_{RSN}=10$  dB

从图 5 可以看出,传统标定法对于反演所用数据的信噪比不敏感,但当信噪比大于 15 dB 时,比值标定法相比传统标定法误差更小,且随着标定所使用数据的信噪比的减小,这种优势愈发明显。当反演所用数据的信噪比小于 15 dB 时,比值标定法的浓度反演误差较大,但在实际探测中,可以通过累加回波信号、滤波降噪等方式改善信噪比来解决该问题。从图 5(d)~(f) 可以看到,随着标定所使用数据信噪比的减小,反演结果误差曲线不再单纯随反演所用数据的信噪比的增大而减小,误差最小值会出现在标定所使用数据的信噪比附近,并且这种现象随着标定所使用数据信噪比的减小愈发明显。这是因为当噪声大到一定程度时,对系统常数标定带来的影响就无法忽略,标定结果对噪声水平有强烈依赖性,在反演所用数据信噪比较

好的情况下反演误差反而更大,并且这种现象随噪声的增大愈发明显。该现象是应该极力避免的,故在实际标定时应该通过选取干扰小的实验环境、多次累加信号等方式改善信噪比,进而提升系统常数标定的准确度。总体而言,比值标定法可以达到不亚于传统标定方法的精度与稳定性。

下面进一步讨论几何因子对标定结果的影响。假设系统的激光发射光路与望远镜光轴存在 1.2 mrad 的偏差,则系统的几何因子与距离的关系曲线如图 6 (a) 所示。取标定时使用数据的信噪比为 30 dB,保持其他参数不变。反演验证时在每一个信噪比下生成 100 组模拟回波信号,得到对应的目标有机气溶胶浓度反演结果,并计算在半峰全宽内的均方根误差。两种标定方法的浓度反演误差如图 6(b) 所示。

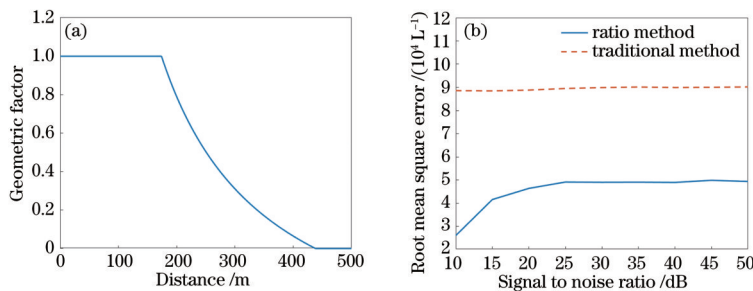


图 6 几何因子变化对两种标定方法反演结果的影响。(a) 激光发射光路与望远镜光轴存在 1.2 mrad 的偏差时,几何因子与距离的关系曲线; (b) 不同信噪比下基于两种标定方法的目标气溶胶浓度反演误差曲线  
 Fig. 6 Influence of geometric factor variation on inversion results of two calibration methods. (a) Relationship curve between geometric factor and distance when deviation between laser emission optical path and optical axis of telescope is 1.2 mrad; (b) error curves of target aerosol concentration retrieval based on two calibration methods under different signal to noise ratios

从图 6 中可以看出,几何因子发生改变对两种标定方法均产生了影响,但从反演结果在半峰全宽内的

均方根误差来看,比值标定法相对传统标定法,误差平均小  $4.48 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$ 。从图 6(b) 中可以看出,误差随反

演所用数据信噪比的增大而增大,这是因为此时的误差是噪声和几何因子共同影响的。几何因子的改变使得回波信号强度比正常情况要小,这就导致反演出的浓度要小于真实值,而在低信噪比时大量噪声的加入恰好使得回波信号强度有所提升,导致误差在低信噪比区较小。

在激光雷达的实际使用中,由于机械振动、工作环境改变和光路失准等因素的存在,故经常会有几何因子曲线发生改变的情况,比值标定法通过荧光-米信号比的形式减小了系统几何因子带来的影响,使系统常数标定结果的稳定性得到了提升。

## 4 系统标定实验与分析

为验证所提标定方法的实际效果,利用一台水平近场探测激光雷达进行实验。该激光雷达系统采用同轴收发结构,具体参数如表 1 所示。使用一台 AeroTrak 9306 型粒子计数器配合激光雷达完成标定实验,为排除水汽干扰,在粒子计数器前加装干燥管。实验中使用一台超声雾化器发生气溶胶,选用营养肉汤溶剂作为样品。实验在一个长 50 m、宽 2.5 m 的狭长通道内进行,为了防止粒子计数器饱和,将其放在超声雾化器前面 5 m 的位置处。实验场景如图 7 所示。

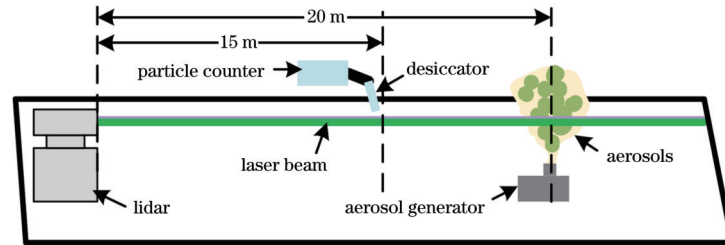


图 7 实验场景示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental scene

首先,进行系统常数标定,粒子计数器得到的浓度

随时间变化的曲线如图 8(a)所示,激光雷达系统探测

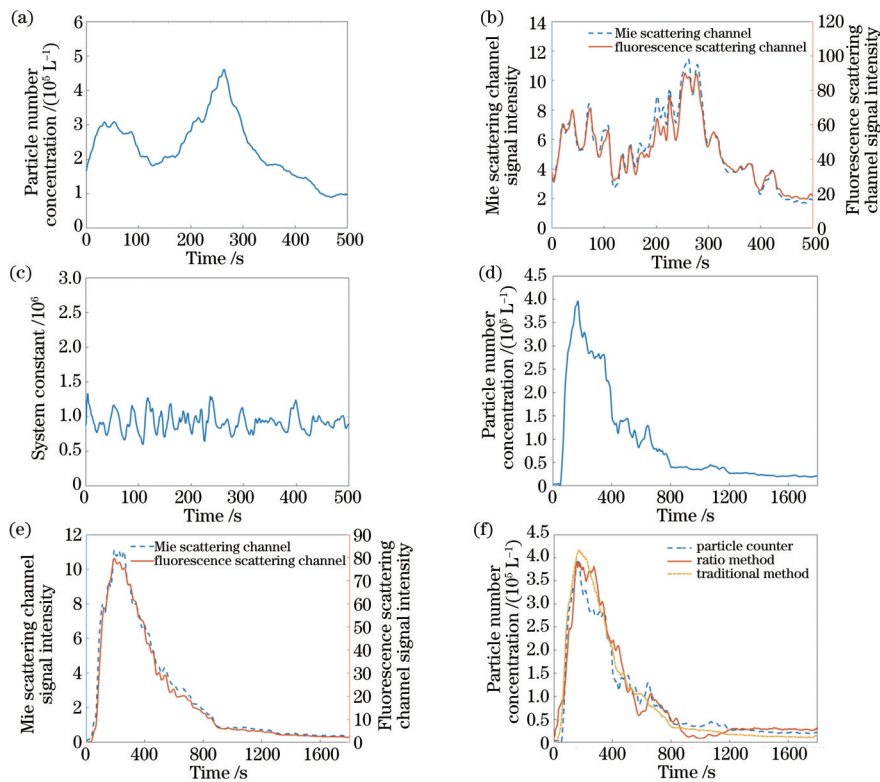


图 8 系统常数标定实验结果图。(a)第一次实验中粒子计数器得到的浓度随时间变化的曲线;(b)第一次实验中激光雷达系统探测到的回波信号;(c)计算得到的系统常数随时间变化的曲线;(d)第二次实验中粒子计数器得到的浓度随时间变化的曲线;(e)第二次实验中激光雷达系统探测到的回波信号;(f)反演得到的 15 m 位置处粒子浓度随时间变化的曲线

Fig. 8 Results of system constant calibration experiments. (a) Curve of concentration varying with time obtained by particle counter in first experiment; (b) echo signal detected by lidar system in first experiment; (c) curve of system constant varying with time obtained by calculation; (d) curve of concentration varying with time obtained by particle counter in second experiment; (e) echo signal detected by lidar system in second experiment; (f) curve of particle concentration varying with time at position of 15 m obtained by inversion

到的回波信号如图 8(b)所示,使用所提标定方法得到的系统常数随时间变化的曲线如图 8(c)所示。然后,对所提标定方法得到的系统常数求均值得到系统常数标定结果为  $k \approx 9.2358 \times 10^5$ 。最后,在相同的条件下再进行一次验证实验,使用粒子计数器所在位置(15 m)不同时间的探测数据进行验证。用激光雷达和粒子计数器同时记录探测结果,此次粒子计数器得到的浓度随时间变化的曲线如图 8(d)所示,激光雷达系统探测到的回波信号如图 8(e)所示,使用前一步标定的系统常数  $k$  计算得到的反演结果和用传统标定方法计算得到反演结果如图 8(f)所示。

从图 8(f)中可以看出,使用比值标定法和作为参考的传统标定方法得到的反演结果在半峰全宽内(探测时间为 80~400 s)的均方根误差分别为  $4.83 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$  和  $4.58 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$ 。反演结果与粒子计数器计数结果之间的误差可能与环境噪声较大和通道中不可避免的微风有关。同时,粒子计数器每隔 15 s 记录一组数据,受气溶胶自然沉降和通道中气流的影响,必然会产生一定误差。此外,对于所提标定方法,弹性后向散射系数的反演也会带来一定的误差。由于在标定实验中通道距离有限,探测路径上不存在完全不受样品气溶胶影响的位置,故参考点的选取非常困难,并且参考点位置的气溶胶浓度也会受到通道中气流的影响,带来一定误差。总体而言,所提标定方法有较好的可行性和可操作性,进而可以被应用于实际系统的标定中。

## 5 结 论

提出一种针对水平近场浓度探测的荧光激光雷达系统常数标定方法。通过假设近场探测时在荧光回波中心波长和米散射回波波长处气溶胶消光的差异不是很大,推导出了一个简易可行的标定公式。通过仿真分析验证了所提标定方法可以达到不亚于传统标定方法的精度与稳定性。同时,所提方法利用荧光-米信号比的形式减小了系统几何因子带来的标定误差,减小了后续探测中机械振动、工作环境改变和光路失调等因素导致的几何因子变化而引入的探测误差。此外,对一台水平近场探测荧光激光雷达进行实际标定实验。结果表明,所提系统常数标定方法准确可靠,在实际荧光激光雷达标定中有可行性和可操作性。

### 参 考 文 献

- [1] Yang H, Sun Y F, Wang T D, et al. Study on bioagents or bioaerosols standoff detection by lidar[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 44: 02030.
- [2] Hill S C, Williamson C C, Doughty D C, et al. Size-dependent fluorescence of bioaerosols: mathematical model using fluorescing and absorbing molecules in bacteria[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, 157: 54-70.
- [3] Huffman J A, Perring A E, Savage N J, et al. Real-time sensing of bioaerosols: review and current perspectives [J]. Aerosol Science and Technology, 2020, 54(5): 465-495.
- [4] Shoshanim O, Baratz A. Daytime measurements of bioaerosol simulants using a hyperspectral laser-induced fluorescence LIDAR for biosphere research[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(5): 104392.
- [5] Wojtanowski J, Zygmunt M, Muzal M, et al. Performance verification of a LIF-LIDAR technique for stand-off detection and classification of biological agents [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 67: 25-32.
- [6] Stoyanov D, Nedkov I, Groudeva V, et al. Long-distance LIDAR mapping schematic for fast monitoring of bioaerosol pollution over large city areas[M]// Atmospheric air pollution and monitoring. London: IntechOpen, 2020.
- [7] Chen S Y, Chen Y Y, Zhang Y C, et al. Dual-channel mobile fluorescence lidar system for detection of tryptophan[J]. Applied Optics, 2020, 59(3): 607-613.
- [8] Simard J R, Roy G, Mathieu P, et al. Standoff sensing of bioaerosols using intensified range-gated spectral analysis of laser-induced fluorescence[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 865-874.
- [9] Li B W, Chen S Y, Zhang Y C, et al. Fluorescent aerosol observation in the lower atmosphere with an integrated fluorescence-Mie lidar[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 227: 211-218.
- [10] Jönsson E, Steinvall O, Gustafsson O, et al. Standoff lidar simulation for biological warfare agent detection, tracking, and classification[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7665: 766509.
- [11] Simard J R, Mathieu P, Larochelle V, et al. Active range-gated spectrometric standoff detection and characterization of bioaerosols[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3707: 116-128.
- [12] Ångström A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air[J]. Geografiska Annaler, 1929, 11(2): 156-166.
- [13] 邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 紫外双波长激光雷达系统研制与信噪比分析 [J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1201004.  
Shao J F, Hua D X, Wang L, et al. Development of ultraviolet dual-wavelength lidar and analysis of its signal-to-noise ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1201004.
- [14] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [15] Werner C, Streicher J. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere[M]. Cham: Springer, 2005.
- [16] Stockie J M. The mathematics of atmospheric dispersion modeling[J]. SIAM Review, 2011, 53(2): 349-372.
- [17] 丁红波, 王珍珠, 刘东. 激光雷达信号去噪方法的对比研究[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2401001.



- Ding H B, Wang Z Z, Liu D. Comparison of de-noising methods of LiDAR signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2401001.
- [18] Buthiran V, Razdan A K. Parametric studies of fluorescence lidar for detection of biological warfare agents in the atmosphere[J]. *Journal of Battlefield Technology*, 2011, 14(2): 5-12.
- [19] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 211-220.
- [20] 赵强, 苏红超, 易明建, 等. 激光雷达探测建筑基坑开挖阶段气溶胶水平分布[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2010001.
- Zhao Q, Su H C, Yi M J, et al. Aerosol horizontal distribution detected by lidar in excavation stage of construction site foundation pit[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2010001.